

PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ STRUKTURALNYCH W ZAKRESIE OCHRONY STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH PRZED UDERZENIEM PIORUNA

SZYMON ZDĘBSKI

Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa,
szymon.zdebski@ilot.edu.pl

Streszczenie

Artykuł opisuje konstrukcje kompozytowe stosowane w lotnictwie, które narażone są na wyładowania atmosferyczne. Zaprezentowano skutki wyładowania atmosferycznego w kontakcie z kompozytem węglowym. Przedstawiono sposób ochrony kompozytu z użyciem zalaminowanej siatki odprowadzającej ładunki elektryczne oraz odprowadzającej i odbierającej ciepło. Przybliżono technologię wytwarzania siatki, budowę siatki LSP oraz sposób doboru odpowiedniego wariantu siatki LSP. Użyto siatki miedzianej, która umożliwiła odprowadzenie ładunków do zewnętrznej powierzchni obiektu latającego, nie tylko rozproszania ładunku elektrycznego w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca uderzenia pioruna. Zweryfikowano zasadność wyboru siatki miedzianej i sposobu aplikacji za pomocą wyników prób technologicznych wykonania ochrony przeciwpiorunowej na kompozytach.

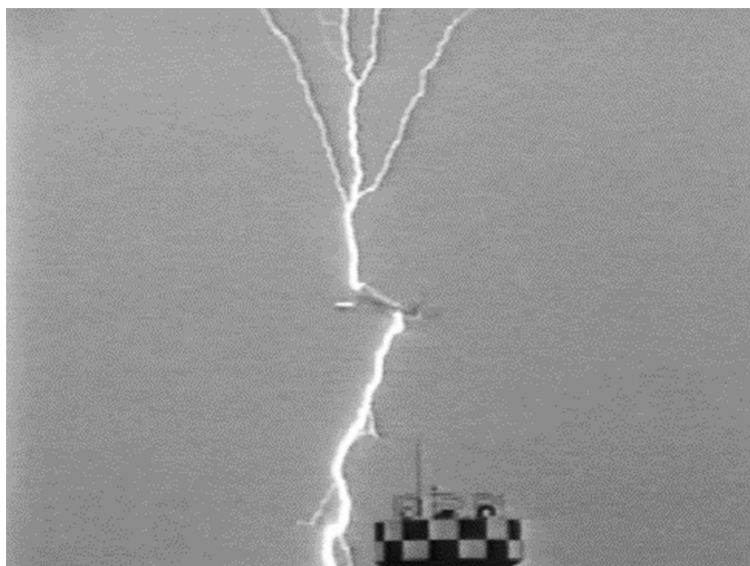
Przedstawiono ryzyko na jakie narażone są samoloty i śmigłowce podczas swoich lotów oraz sposoby minimalizacji szkód powstałych w wyniku wyładowań atmosferycznych.

Słowa kluczowe: Struktury kompozytowe, samolot, piorun, siatka, aluminium, miedź, śmigłowiec.

1. WSTĘP

Wyładowania atmosferyczne niosą zagrożenie dla statków powietrznych. Nawet samoloty pasażerskie, które nie realizują misji, ale dostosowują się do warunków pogodowych, ulegają – statystycznie – raz na rok trafieniu piorunem (dane dot. amerykańskich samolotów pasażerskich) [1]. Literatura zauważa, że zabezpiecza się nawet samoloty metalowe, których pokrycie samo w sobie stanowi zabezpieczenie dla aparatury i załogi [2]. Bezspornie zatem należy zabezpieczać struktury kompozytowe. Temperatura, którą osiąga trafiona struktura, z której nie odprowadzi się ładunku, jest szacowana na ok. 25 000°C. Wystarczająca by wypalić otwór w każdym materiale kompozytowym. Ponadto samolot poruszając się w chmurze sam wytwarza ładunki na ostro

zakończonych elementach wywołując wyładowania koronowe. Samoloty wykonane z metalu, bez elektronicznych urządzeń awioniki są bardziej odporne na wyładowania elektryczne. Dlatego ta grupa samolotów, w świetle przepisów amerykańskiej Federalnej Agencji Lotniczej (FAA-*Federal Aviation Administration*) nie jest objęta wymogiem ochrony przeciw piorunowej. Gdy piorun uderza w taki samolot w obszarze naładowanym dodatnio, ładunek elektryczny przebiega po zewnętrznych strukturach, opuszczając go w obszarze o przeciwnej polarności (lub odwrotnie). Rys. 1 przedstawia samolot rażony piorunem w Japonii [3].



Rys. 1. Samolot rażony piorunem [3]

Samolot jest narażony na skutki bezpośrednie, zwłaszcza fizyczne zniszczenie samolotu lub wyposażenia, wskutek przewodzenia prądu elektrycznego. Czynniki niszczącymi wówczas są, zgodnie z materiałami firmy Sikorsky na temat ochrony samolotu i awioniki przed wpływem wyładowań atmosferycznych [4]:

1. przebicie elektryczne,
2. obdzieranie, gięcie, topienie, palenie, dziurkowanie, odparowanie struktury lub komponentów samolotu,
3. wstrząs magnetyczny,
4. fala uderzeniowa, nadciśnienie,
5. wybuch oparów paliwa,
6. magnetyzm resztkowy,
7. bezpośrednie wnikanie prądu elektrycznego do przewodów i kabli.

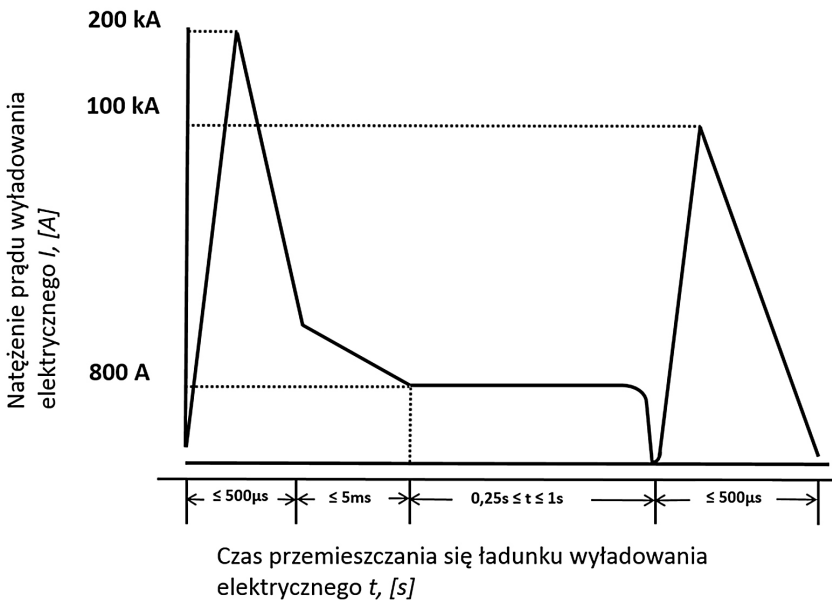
Prócz skutków bezpośrednich istnieją jeszcze pośrednie - przejściowe zmiany pola magnetycznego wywołane przepływem prądu elektrycznego.

Obowiązek ochrony przeciw piorunowej wg przepisów FAA dotyczy m.in. wszystkich aparatów latających przewożących usługowo pasażerów i odnosi się do zdolności wytrzymania bezpośrednich i pośrednich skutków uderzenia pioruna. Koresponduje z normami ARP (*Aerospace*

Recommended Practice):

1. SAE ARP5412: opis środowiska i powiązane schematy uderzeń testowych,
2. SAE ARP5413: certyfikacja systemów elektrycznych i elektronicznych samolotu pod kątem pośrednich skutków uderzenia pioruna,
3. SAE ARP5414: podział samolotu (oraz śmigłowca) na strefy o różnym narażeniu,
4. SAE ARP5416: metody badań.

Rys. 2 [5] prezentuje mechanizm typowego uderzenia piorunem (składniki prądu). W funkcji czasu wyraża natężenie prądu elektrycznego przepływającego po powierzchni samolotu. Jest to punkt wyjścia do symulacji uderzenia piorunem:

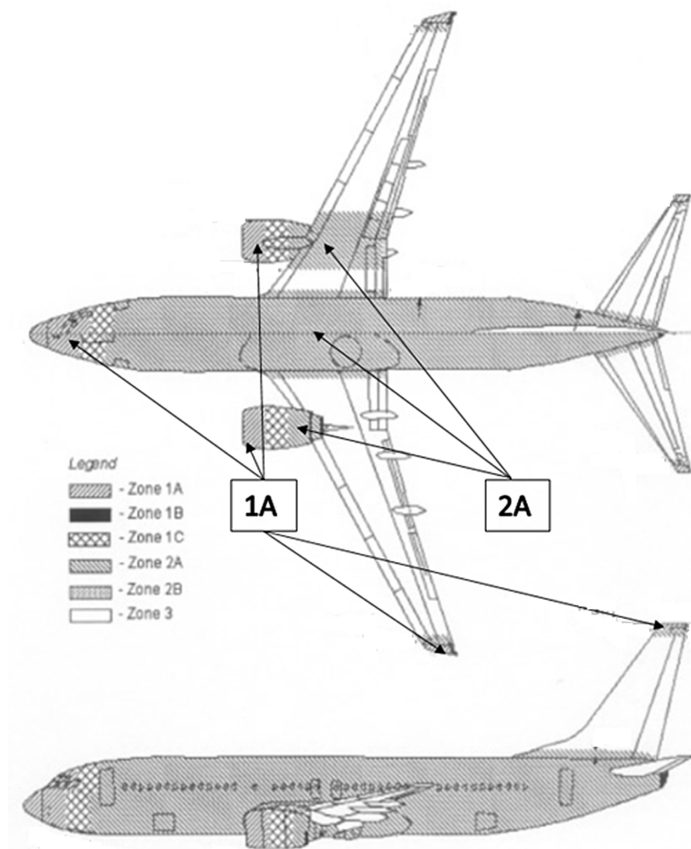


Rys. 2. Mechanizm typowego uderzenia pioruna w obiekt latający [5]

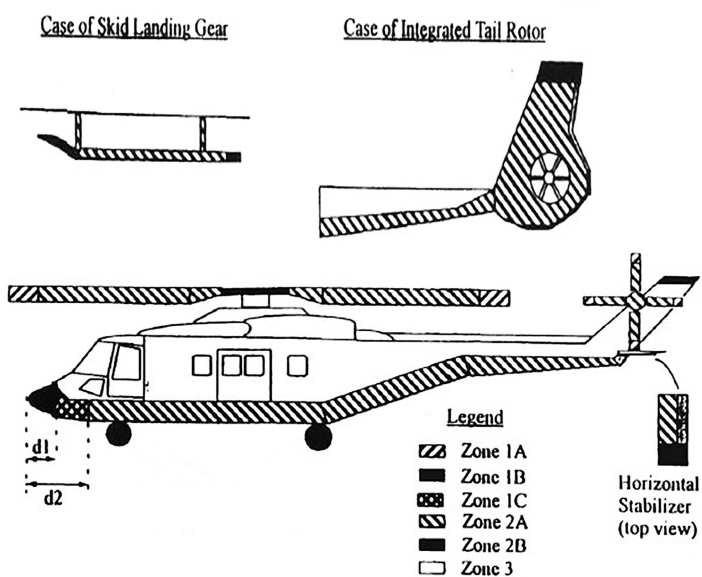
W zależności od warunków atmosferycznych Rys. 2 może mieć różny przebieg. Norma SAE ARP5414 dzieli aparat latający na różne strefy w zależności od stopnia rażenia. Rys. 3 [6] pokazuje podział na strefy rażenia dla samolotu pasażerskiego, Rys. 4 [7] pokazuje ten podział dla śmigłowca. Celem jest określenie stref, gdzie może dojść do wejścia pioruna oraz trasy przejścia i potencjalnego miejsca wyjścia pioruna.

Podział obiektu latającego został dokonany na podstawie sposobu przejścia pioruna (6 stref), wg [6]:

1. 1A: strefa pierwszego przejścia powrotnego,
2. 1B: strefa pierwszego przejścia powrotnego z długim czasem trwania,
3. 1C: strefa przejściowa między strefami,
4. 2A: strefa przemieszczania piorunem (wejście i opuszczenie konstrukcję na przeciwnych końcach),
5. 2B: strefa przemieszczania piorunem z długim czasem trwania,
6. 3: strefa napięcia przewodzonego.



Rys. 3. Strefy rażenia piorunem na samolocie [6]



Rys. 4. Strefy rażenia piorunem na śmigłowcu [7]

2. WERYFIKACJA APLIKACJI

2.1. Mechanizm działania ochrony przeciw piorunowej struktur kompozytowych

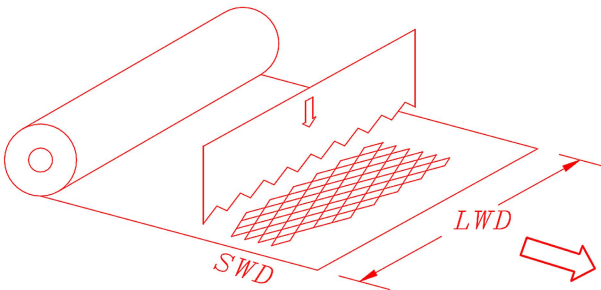
Ochrona przeciw piorunowa (LSP – *Lightning Strike Protection*) opisywana w tym artykule nie ma na celu uchronić statek powietrzny przed uderzeniem pioruna, ale zminimalizować jego skutki do poziomu pozwalającego na powrót na najbliższe lotnisko. Osiąga się to przez odprowadzenie ładunku po strukturze, by nie przedostał się w głąb materiału. Struktury metalowe spełniają to zadanie dobrze bez wprowadzania dodatkowych elementów. Kompozyty natomiast przewodzą prąd elektryczny gorzej, ponadto są bardziej podatne na uszkodzenia wskutek temperatury. O skuteczności opisywanych w tym artykule materiałów świadczy fakt, że od 1967 roku nie odnotowano utraty samolotu w związku z uderzeniem pioruna.

2.2. Materiały stosowane w ochronie przeciw piorunowej struktur kompozytowych

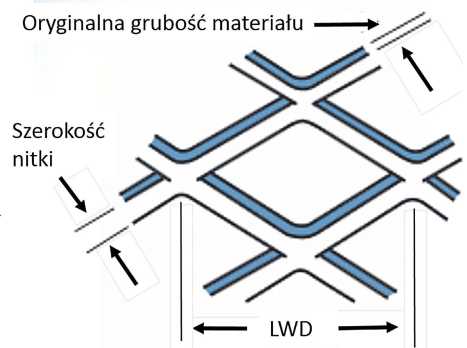
Rozprowadzenie ładunku po powierzchni materiału kompozytowego poprawia zatopienie elementu metalowego w jego wierzchniej warstwie. Istnieją również koncepcje zastosowania przewodnej matrycy, żywica epoksydowa ma być przewodzącym prąd plastikiem. Nie ma takich materiałów na rynku, jednak prace nad nimi trwają na Politechnice Śląskiej, kieruje nimi dr hab. inż. Andrzej Katunin [8]. Jak opisano w artykule o strategiach ochrony struktur kompozytowych przed uderzeniem pioruna [9], stosuje się typowo siatki wykonane z:

1. stopy aluminium,
2. miedź,
3. włókna węglowe pokryte brązem lub niklem,
4. inne materiały pokrywane metalami.

Najczęściej stosowane siatki są produkowane metodą ekspandowania, jak pokazuje Rys. 5 [10]. Folia po nakłuciu jest rozciągana wzdłuż strzałki, jak na Rys. 5. Kierunek główny materiału powinien być zgodny z kierunkiem odprowadzenia ładunku. Kierunkowi głównemu odpowiada kierunek opisany jako LWD (*Long Way Diamond*). W skali pojedynczego oczka kierunek przebiegu ładunku zaprezentowany jest na Rys. 6 [10].



Rys. 5. Wytwarzanie siatki metalowej metodą ekspandowania [10]



Rys. 6. Powiększenie oczka siatki [10]

W celu poprawnego ułożenia siatki, na przykładzie łopaty śmigłowca, kładzie się siatkę wzdłuż jej szerokości (rolki) po promieniu łopaty. W ten sposób długie kawałki należy składać z wielokrotności szerokości rolki. Wynika to stąd, że: mimo iż oczka są kształtu rombu, więc ich boki mają równą długość, to kąty są inne. Ładunek pokonując taką samą drogę w metalu w kierunku LWD przemieszcza się w jednostce czasu dalej niż w kierunku poprzecznym. W ten sposób krócej przebywa w kompozycie, co jest celem tej aplikacji.

Pozostaje jeszcze ochrona obszarów, gdzie nie można dopuścić do ekranowania elektromagnetycznego, a są zazwyczaj krytyczne dla działania samolotu: kopuły radarów (*radomes*). W tej sytuacji stosuje się taśmy zbierające ładunek (odchylającego jego bieg). Są montowane na zewnętrznej powierzchni elementu i mają transportować ładunek do kadłuba. Ich kształt sprzyja szybkiemu przepływowi powietrza a zarazem nie ekranuje kopuły radaru czy anteny.

Istnieje również zagrożenie wdarcia się ładunku w okolice zbiorników paliwa. Wytyczne dotyczące zabezpieczenia kompozytowych zbiorników paliwa (wg FAA) mówią o konieczności izolacji elektrycznej śrub, nitów użytych w strukturze. Ponadto ścianki zbiorników mają być dostatecznie grube, by nie doszło do przepalenia na wskroś. Kryterium jest spełnienie założeń dalszego działania struktury i elektryki/elektroniki po rażeniu prądem o natężeniu 200 000 A. Większość piorunów razi prądem nie przekraczającym 150 000 A. Te dane potwierdza norma SAE ARP5412.

2.3. Dobór materiałów do ochrony przeciw piorunowej struktur kompozytowych

Siatki aluminiowe są tańsze i lżejsze dla zadanego przekroju, ale nie mogą być stosowane do struktur wzmacnianych włóknem węglowym. Następuje wówczas korozja galwaniczna na styku węgiel-aluminium [11]. Wprawdzie nie jest to najgorsza z możliwych sytuacji, ponieważ stosunek powierzchni katoda (węgiel) – anoda (aluminium) jest stosunkowo niewielki, ale i tak kombinacja tych materiałów bez ochrony powierzchni jest wykluczona. W tej sytuacji należy zastosować siatki wykonane z miedzi lub pokrywanych włókien węglowych. Siatki z pokrywanych włókien węglowych nie są komercyjnie dostępne, zatem pozostają siatki miedziane. Producenci tych materiałów oferują siatki w postaci surowej oraz zatopione w żywicy, zwane Surface Film. Gwarantują dobrą jakość powierzchni, prawidłowe przesycenie. Użycie surowej siatki niesie ze sobą ryzyko uzyskania nierównej powierzchni oraz delaminacji pod wpływem obciążeń cyklicznych. Ta opcja została wybrana do sprawdzenia.

2.4. Metoda weryfikacji aplikacji, próby przeprowadzone w Centrum Technologii Kompozytowych (CKT)

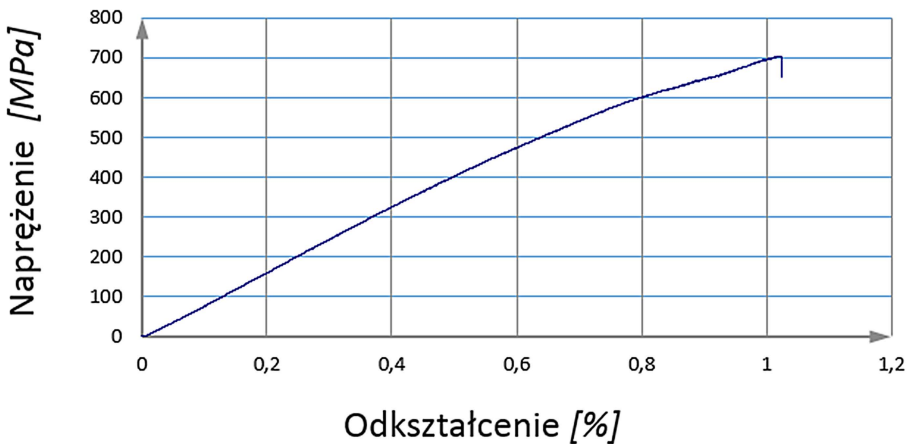
Algorytm doboru materiału w CKT był następujący:

1. sprawdzenie kompatybilności materiałów z kompozytem węglowo-epoksydowym,
2. wybór gramatury zgodnie z danymi literaturowymi,
3. sprawdzenie dostępności danego materiału na rynku,
4. wykonanie próbek z siatką zatopioną w używanych prepegach,
5. przeprowadzenie prób obciążeń cyklicznych pod kątem delaminacji.

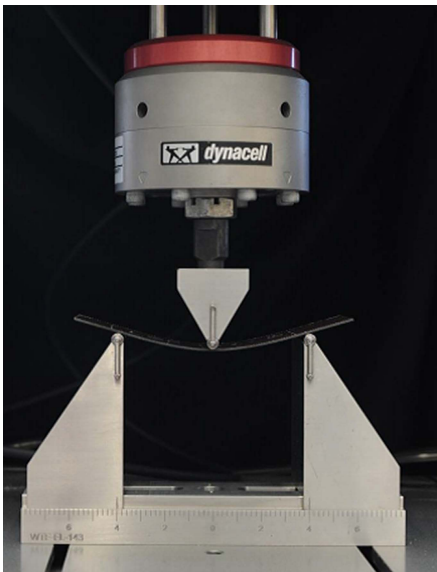
Podpunkt 5. został zrealizowany za pomocą dwuetapowego badania próbki prostokątnej o wymiarach 50,86 x 128,08 mm, grubości 1,204 mm. Próbka miała układ warstw imitujący przykładowe struktury pokrycia łopatki z siatką miedzianą jako zewnętrzną warstwą. Pierwszy etap obejmował zginanie trójpunktowe próbki do zniszczenia, by określić poziom naprężeń niszczących. Próbka nie była wystarczająco sztywna i nie uległa zniszczeniu, a została wciągnięta między punkty podparcia (rozstaw 101,6 mm). W związku z tym wyznaczono siłę maksymalną i związane z nim przemieszczenie.

1. Siła maksymalna: $F_{\max 1} = 217 \text{ N}$,
2. Przemieszczenie: $d_{\max 1} = 37,46 \text{ mm}$

Rys. 7 [12] prezentuje zależność naprężenia od odkształcenia danej próbki.



Rys. 7. Wykres naprężenie - odkształcenie dla próbki kompozytowej z siatką miedzianą [12]



Rys. 8. Próbkę na stanowisku do badań zmęczeniowych [13]

Drugi etap to badanie zmęczeniowe, liczba cykli 1440000, współczynnik asymetrii cyklu $R = 0,1$. Rys. 8 przedstawia zdjęcie z procesu badania [13].

Następnie próbkę poddawano obciążeniom cyklicznym na poziomie 70% statycznych obciążeń maksymalnych.

Próbka co 36 000 cykli była poddawana ocenie wizualnej, nie stwierdzono żadnych uszkodzeń, ani delaminacji pomiędzy laminatem, a siatką miedzianą.

Zależnie od mechanizmu pracy danego komponentu należy dobrać odpowiednią liczbę cykli. Z uwzględnieniem ograniczenia maksymalnej częstotliwości do 10 Hz. Wyższa częstotliwość powoduje wydzielanie ciepła w kompozycie. Badania były prowadzone na dwóch układach warstw:

1. [45/0/45/0/45/(siatka miedziana)],
2. [0s/(siatka miedziana)].

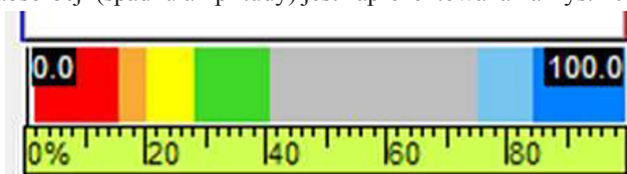
Próbki były poddane badaniom z siatką od spodu (rozciąganie) i z siatką od góry (ściskanie). Ponadto badano próbki przechowywane w warunkach pokojowych oraz kondycjonowane przez 1 godzinę we wrzącej wodzie. Badania były przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Instron Electropuls E3000 z głowicą siły 5 kN.

Podczas prób zmęczeniowych próbki były kontrolowane wizualnie co 36 000 cykli, a na końcu testu były poddane badaniom ultradźwiękowym. Zdaniem inspektora nie wystąpiły w nich żadne delaminacje na granicy laminat – siatka miedziana. Ocena wizualna również nie wykazała żadnych nieprawidłowości. Rys. 9 [14] prezentuje wyniki badania ultradźwiękowego. Badanie wykonano na urządzeniu Olympus Omniscan MX, techniką Phase Array. Rys. 9 przedstawia zobrazowanie C-Scan (decybelowy spadek amplitudy echa dna). Obraz na Rys. 9. to widok próbki z góry, dwuwymiarowy. Jednolity kolor oznacza, że materiał jest jednorodny. Kolor szary (pokrywający cały obszar Rys. 9) oznacza, że spadek echa dna nie przekroczył 6 dB.



Rys. 9. Badanie NDT (*Non Destructive Test*) metodą ultradźwiękową: zobrazowanie metodą C-Scan [14]

Ewentualne delaminacje byłyby oznaczone przez kolory od czerwonego (0% na skali) do zielonego (40% na skali). Na Rys. 9 jest widoczny kolor z zakresu 40-74% (Rys. 10). Skala kolorów odpowiadających różnym poziomom absorpcji (spadku amplitudy) jest zaprezentowana na Rys. 10 [14].



Rys. 10. Badanie NDT metodą ultradźwiękową: skala kolorystyczna obrazująca poziomy absorpcji [14]

2.5. Metoda weryfikacji działania, próby.

Producenci materiałów mających zapewnić odprowadzenie ładunków oraz laboratoria konsultujące takie konstrukcje używają instalacji symulujących uderzenie pioruna. Podstawą do takiego badania jest określenie prawdopodobnych stref do trafienia piorunem. Następnie określany

jest mechanizm uderzenia. Do symulacji dochodzi na uziemionym stanowisku testowym. W Polsce takie badanie wykonuje się w Instytucie Energetyki w Warszawie (próby wysokonapięciowe) oraz w Instytucie Fizyki i Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (próby wysokoprądowe). Te laboratoria badały śmigłowce W-3A, SW-4 oraz samolot PZL M28 SKYTRUCK, zakończone uzyskaniem certyfikatu [15]. Badania ochrony przeciw piorunowej struktur kompozytowych nawiązują do jednej ze specjalizacji Instytutu Lotnictwa – Badania Materiałów, a zwłaszcza jej części dotyczącej kompozytów. Opracowanie systemu zerowania ładunków elektrostatycznych w kompozytach [16] było elementem programu budowy samolotu kompozytowego I-23 MANAGER oraz może znaleźć zastosowanie w konstrukcji kompozytowego śmigłowca bezpilotowego ILX-27 [17].

3. WYBÓR, TECHNOLOGIA APLIKACJI SIATKI MIEDZIANEJ I WYNIKI

Do zastosowania w typowych kompozytowych strukturach lotniczych wzmocnionych włóknem węglowym należy wybrać siatkę miedzianą. Jej geometria i grubość wpływają na przewodnictwo. Wybór odpowiedniej gramatury jest złożony i należy go przeprowadzić w oparciu o poradę specjalistów zajmujących się sprzedażą systemów ochrony przeciw piorunowej dla lotnictwa. Na rynku znajdują się dostawcy oferujący fachową pomoc. Można wyróżnić firmę AeroConsultants, która dystrybuje siatki firmy Dexmet albo BenMetal sprzedający swój produkt o nazwie AeroMesh.

Siatka miedziana zatopiona w żywicy (surface film) jest używana jako warstwa zewnętrzna. Jej zużycie w porównaniu z materiałami podstawowymi jest niewielkie (ok. 1:10). Połączenie minimalnych ilości zakupu na poziomie 50 m² (MOQ – *minimal order quantity*) i rocznego terminu przechowywania w warunkach mroźnych (*shelf life*) dla warsztatu robiącego prototypy skutkuje przeterminowaniem materiału. Z tego względu zdecydowano się na zakup siatki w postaci surowej i zatopienie go, konsolidując warstwy za pomocą worka próżniowego.

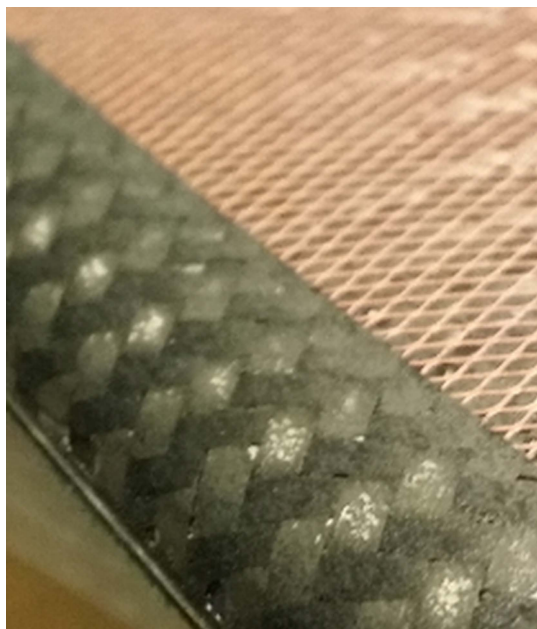
3.1. Technologia aplikacji

Siatka była konsolidowana z prepregiem za pomocą worka próżniowego. W Tab. 1 zawarto liczbę warstw, czas konsolidacji i podciśnienie. Zawartość żywicy (objętościowo) w prepregu to 42%.

Tab. 1. Proces technologiczny łącznia siatki miedzianej i prepregu.

Warstwa	Krok 1	Krok 2	Krok 3	Krok 4
Siatka miedziana 107 g/m ²	-0,9 bar; 5 min.;	-0,96 bar; 10 min.;	-0,96 bar; 10 min.;	-0,96 bar; 10 min.;
Prepreg węglowy, gr. 0,23 mm	na płaskiej płycie	w foremniku		
Prepreg węglowy, gr. 0,23 mm				
Prepreg węglowy, gr. 0,23 mm				
Prepreg węglowy, gr. 0,23 mm				

Tak przygotowany pakiet był utwardzany zgodnie z kartą techniczną prepregu.

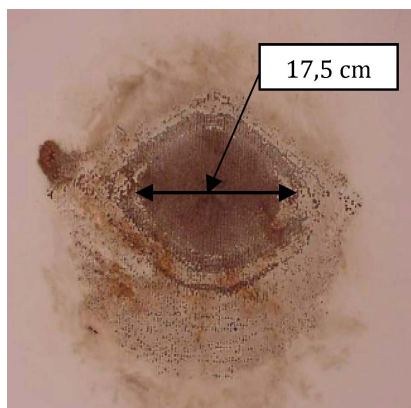


Rys. 11. Siatka miedziana zatopiona w prepregu [autor]

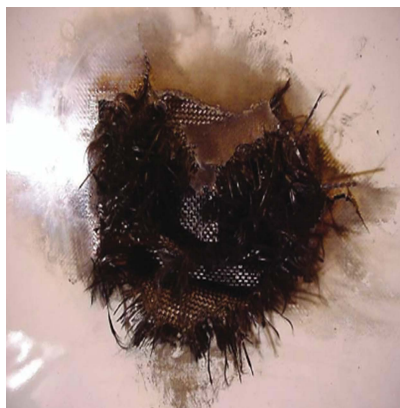
Efekt okazał się pozytywny. Powierzchnia była gładka, z wyjątkiem ostrych przejść kształtu (które prawdopodobnie byłyby kłopotliwe również dla prepregu typu Surface Film). Czas procesu zwiększa się, ale ryzyko straty materiałów jest wyeliminowane (surowa siatka ma nieograniczony czas składowania, ale jest bardzo podatna na zniszczenie mechaniczne). Rys. 11 [autor] przedstawiający poprawne zatopienie siatki w prepregu: brak kraterów (tzw. *pinhole*), powierzchnia zrównana z aerolinią.

4. WYNIKI SYMULACJI UDERZENIA PIORUNEM

Na Rys. 12 [18] i 13 [18] widać różnice w panelu wykonanym z kompozytu węglowo-epoksydowego z przekładką typu plaster miodu (wykonany z papieru aramidowo-fenolowego). Pomimo różnicy w rodzaju struktury kompozytowej, uszkodzenia tutaj przedstawione obrazują efekty uderzenia pioruna. Podkreślają różnice pomiędzy panelami kompozytowymi z ochroną przeciwpiorunową i bez niej. Panel na Rys. 12 jest zabezpieczony siatką aluminiową z dodatkową warstwą szkła S-2 pomiędzy warstwami węglowymi, a siatką. Panel na Rys. 13, przekładkowy bez siatki LSP. Oba zostały poddane uderzeniom pioruna.

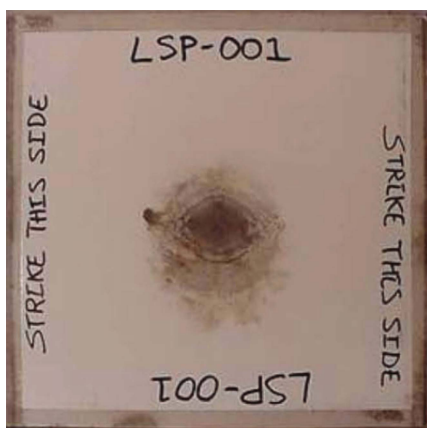


Rys. 12. Panel przekładkowy z LSP po uderzeniu pioruna [18]



Rys. 13. Panel przekładkowy bez LSP po uderzeniu pioruna [18]

Producent wskazuje, że siatka aluminiowa lepiej chroni niż miedziana. Co wydaje się nieintuicyjne, jako że miedź jest lepszym przewodnikiem. Różnice w zniszczeniach (Rys. 12 i 13) na korzyść panelu z siatki aluminiowej może tłumaczyć dodatkowa warstwa, bardzo mocnego, szkła S-2 (która nie jest konieczna dla miedzi). Konieczność stosowania warstwy szklanej zwiększa pracochłonność wykonania panelu (nieznacznie) i masę (znacznie).



Rys. 14. Panel przekładkowy z aluminiową siatką LSP po uderzeniu pioruna [18]



Rys. 15. Panel przekładkowy z miedzianą siatką LSP po uderzeniu pioruna [18]

5. WNIOSKI

Dla podsumowania przedstawiono wybór danego materiału na ochronę LSP:

1. Stopy aluminium w kontakcie z włóknem węglowym korodują galwanicznie, zatem należy stosować miedź albo izolować warstwy węgla od stopów aluminium za pomocą szkła.
2. Siatka aluminiowa jest tańsza niż siatka miedziana (szacunkowa różnica to 25% na korzyść siatki aluminiowej), ale wymaga wytworzenia cięższej struktury ($\sim 200 \text{ g/m}^2$). Jeśli warstwa szkła jest kładzona tylko w celu izolacji przed LSP, wówczas taki panel jest droższy (dodatkowy koszt 1 m^2 prepregu szklanego to ok. 30 €, pracochłonność jest tutaj pomijalna).
3. Cięższy (ok. 200 g/m^2) i droższy (30 €/m^2) panel z siatką aluminiową (cięższy, bo z dodatkową warstwą szkła, często podwójną, dla zwiększenia prawdopodobieństwa szczelności) efektywniej chroni przed wypaleniem przez piorun.
4. Panele kompozytowe zabezpieczone na jeden z obu sposobów zachowują integralność, oba muszą zostać naprawione lub wymienione. Różnica polega na wielkości powierzchni, jaka musi zostać poddana naprawie.
5. Siatka miedziana LSP o gramaturze 107 g/m^2 , grubości $0,102 \text{ mm}$, o symbolu AE 107 R firmy BenMetal ulega zatopieniu (punkt 3.1) w prepregu o gramaturze wzmocnienia 199 g/m^2 , zawartości żywicy 42%. Powierzchnia takiego materiału nie wymaga dodatkowej obróbki przed malowaniem.
6. Jeśli występuje potrzeba użycia cieńszego prepregu powierzchniowego wówczas można użyć spłaszczonej wersji siatki LSP, która jest dwukrotnie cieńsza dla danej gramatury (dla siatki o gramaturze 107 g/m^2 , grubość $0,050 \text{ mm}$, symbol AE 107 F).

7. Prawidłowo wykonane połączenie prepreg-siatka LSP miedziana nie ulega delaminacji w próbie zmęczeniowej o parametrach: liczba cykli 1440000, współczynnik asymetrii cyklu $R = 0,1$, obciążenia cykliczne na poziomie $55 \div 70\%$ naprężeń niszczących, częstotliwość $f = 10$ Hz. [19]
8. Dla uzyskania najwyższej jakości powierzchni, należy użyć gotowych filmów epoksydowych z siatką LSP, tzw. Surface Film, cena to ok. 80 €/m².
9. Ochrona LSP jest koniecznością na wybranych powierzchniach pojazdów latających, narażonych na wyładowania atmosferyczne.
10. Optymalnym materiałem ochronnym dla kompozytów węglowych jest siatka miedziana, a dla kompozytów szklanych (lub takich gdzie nakłada się warstwę szkła na wierzch laminatu) siatka aluminiowa.
11. Struktury, gdzie nie jest wskazane ekranowanie zabezpiecza się taśmami odchylającymi przepływ prądu elektrycznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Scientific American, 2001, "What happens when lightning strikes an airplane?", <http://www.scientificamerican.com/article/what-happens-when-lightni/>.
- [2] Cheda W., Malski M., 1968, Techniczny poradnik lotniczy, WKŁ, Warszawa, rozdział. 8.
- [3] Wisniewski, M. 2010, "Lightning strikes American Airlines plane", <http://www.crh.noaa.gov/pub/lgt.shtml>.
- [4] Majkner, R., 2003, "Overview–lightning protection of aircraft and avionics", http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/lightning_protection_aircraft_avionics.pdf.
- [5] AE-2 Lightning Committee, 2013, Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, ARP5412B.
- [6] AE-2 Lightning Committee, 2012, Aircraft Lightning Zoning, ARP5414A.
- [7] Astrostrike, 2014, "Plane & Helicopter Lightning Strike Zone Diagrams", <http://www.astrosealproducts.com/diagrams.html>.
- [8] Tomala, L., 2015, „Plastik przewodzący prąd ochronić może samolot rażony piorunem”, <http://dlapilota.pl/wiadomosci/pap/plastik-przewodzacy-prad-ochronic-moze-samolot-razony-piorunem>.
- [9] Black, S., 2013, "Lightning strike protection strategies for composite aircraft", <http://www.compositesworld.com/articles/lightning-strike-protection-strategies-for-composite-aircraft>.
- [10] Aeroconsultants, 2015, "Dexmet Lightning Strike Protection", http://www.aero-consultants.ch/page.php?id=621&language=en&titel=Dexmet_Lightning_Strike.
- [11] Yari, M. 2015, "Galvanic Corrosion of Metals Connected to Carbon Fiber Reinforced Polymers", <https://www.corrosionpedia.com/2/1556/corrosion/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers>.
- [12] Bajurko, P., 2015, Specjalista badań materiałów kompozytowych, konsultacja osobista.
- [13] Bajurko, P., 2015, Raport: Badanie statyczne i zmęczeniowe próbek z siatką miedzianą LSP_002 w próbie zginania trójpunktowego, LBK, 95/LK/2015, Warszawa.

- [14] Szymański, R., 2016, Inspektor badań nieniszczących ultradźwiękowych, Instytut Lotnictwa, konsultacja osobista.
- [15] Baron, A., 2012, *Samolot osobowy I-23 „MANAGER”*, *Wybrane problemy badawcze*, Wydawnictwa naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa, rozdział 10.
- [16] Wiśniowski, W., 2014, „Specjalizacje Instytutu Lotnictwa, Przegląd i wnioski”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, **2**(235), str. 7-16.
- [17] Wiśniowski, W., 2014, „XX lat programu samolotów lekkich i bezpieczeństwa (PSLIB)”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, **3**(236), str. 7-25.
- [18] Dexmet Corporation, 2007, Lightning Strike Protection for Carbon Fiber Aircraft, http://www.dexmet.com/1_pdf/LSP%20for%20Carbon%20Fiber%20Aircraft.pdf.
- [19] Guzikowski, R., (w druku), „Weryfikacja eksperymentalna odporności na rozwarstwienie kompozytu z osłoną antypiorunową”, *Prace Instytutu Lotnictwa*.

REVIEW OF STRUCTURAL SOLUTIONS IN REGARD TO LIGHTNING STRIKE PROTECTION OF COMPOSITE STRUCTURES

Abstract

The article describes aviation composite structures exposed to lightning strike. Results of atmospheric discharge with carbon reinforced composite contact were presented. There was shown a way to protect the composite with use of laminated net discharging the electric current as well as discharging and absorbing heat. Manufacturing technology of the net was brought closer, as well as the structure and selection strategy of the LSP net. A copper mesh has been used, that enabled channelling the current to the outer surface of a flying object, not only distribution of the current in direct proximity of the strike. The copper mesh choice has been verified and the application method, by the results of technological trials.

Keywords: composite structures, aircraft, lightning, net, aluminium, copper, helicopter.